

Silniki magnetoelektryczne do hybrydowych napędów samochodowych

Streszczenie. Artykuł prezentuje właściwości rodzaje oraz generacje maszyn elektrycznych stosowanych w napędach hybrydowych pojazdów samochodowych. Na podstawie wyników badań symulacyjnych, wyznaczono moment elektromagnetyczny czterech modeli maszyn z magnesami typu NdFeB w różnych konfiguracjach ich ułożenia. Przedstawiono wpływ rozmieszczenia magnesów wewnątrz struktury wirnika na parametry obwodu magnetycznego silnika.

Abstract. The paper presents propriety, the kinds and the generation of electrical machines applied in hybrid drive car. The electromagnetic moment of model of electrical machines in four configurations of packing of magnets NdFeB type were obtained on the basis of two-dimensional finite element method. The influence of specific location of magnets in rotor part of electrical machines on parameters of magnetic circuit was introduced.

Słowa kluczowe: silnik magnetoelektryczny, magnes, napęd hybrydowy.

Keywords: PM electrical machine, magnet, hybrid driver.

Wstęp

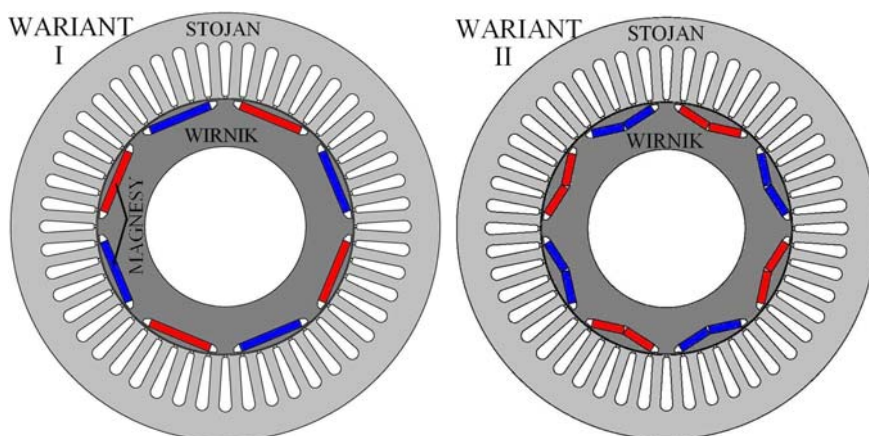
Rozwój maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi, nowych materiałów elektrotechnicznych i magnetycznych, energoelektroniki, systemów sterowania, rozdziału i przetwarzania energii oraz baterii umożliwił postęp w nowoczesnych napędach hybrydowych między innymi do samochodów osobowych. To skutkuje wprowadzaniem przez koncerny samochodowe coraz bogatszej oferty samochodów z napędem hybrydowym lub z napędem tylko elektrycznym jako rozwiązanie przyszłości. Z jednej strony jest to odpowiedź na wzrastające wysokie wymagania techniczne stawiane współczesnym samochodom, z drugiej strony reakcja na trendy proekologiczne w kierunku zmniejszenia emisji spalin, wyznaczone przez kraje wysokorozwinięte. Stąd wynika konieczność udoskonalania rodzajów napędów z maszynami elektrycznymi o wysokich parametrach użytkowych tj.: duży moment obrotowy, mała masa, wysoka sprawność i niezawodność, łatwość sterowania i regulacji w pełnym zakresie prędkości obrotowej i maksymalnym momencie. Wysokie parametry osiągnęte są między innymi dzięki pojawieniu się w ostatnich dekadach wysokoenergetycznych magnesów trwałych oraz nowych koncepcji tworzenia obwodów magnetycznych wzbudzenia, opartych na koncentracji pola magnetycznego, w obszarach przetwarzania energii elektrycznej w mechaniczną. Silną pozycję w tym rozwoju zapoczątkowały układy nazywane Halbach Array i ich późniejsze modyfikacje. Szczególną pozycję zajmują tu również układy z koncentratorami pola magnetycznego polegające na rozmieszczeniu magnesów trwałych na wirnikach maszyn elektrycznych w układach V lub innych nazywanych także gwiazdowym lub mozaikowym. Dzięki takim układom istnieje możliwość znacznego podwyższenia indukcji pola magnetycznego w szczelinach roboczych w porównaniu do klasycznych sposobów ułożeń powierzchniowych magnesów [1].

Specyfika napędu hybrydowego

Współcześnie produkowane hybrydowe pojazdy elektryczne ze względu na napięcie zasilania silnika elektrycznego można podzielić na trzy klasy: Micro Hybrid (42V); Mild Hybrid (100÷250V); Strong Hybrid (powyżej 250V). Systemy Mild są wyposażone w silnik elektryczny o mocy 10-25 kW, wykorzystywany głównie podczas wyprzedzania (efekt BOOT). System Strong wyposaża się w mocniejszy silnik elektryczny, zwykle o mocy ok. 50 kW i generuje moment obrotowy dochodzący do 350 Nm, co zdecydowanie wydajniej wspomaga pracę silnika spalinowego [2,5].

Silnik magnetoelektryczny do systemu hybrydowego

W pojazdach hybrydowych z systemem Strong silnik elektryczny jest bardzo wyrafinowanym urządzeniem. Istnieją pewne konstrukcje maszyn elektrycznych, odpowiednie do tych systemów (również nazywanych Full Hybrid), które są zdolne sprostać wysokim wymaganiom: dużej gęstości mocy, wysokiej sprawności, wytrzymałości przy niskich kosztach ich produkcji, akceptowanym przez przemysł samochodowy.



Rys.1. Struktury maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi wykorzystywanych w systemach hybrydowych

Do tej grupy maszyn należą przede wszystkim maszyny walcowe (cylindryczne) z magnesami trwałymi o wirniku wewnętrznym, ponieważ posiadają wysokie gęstość mocy i dodatkowo, poprawną pracę przy wysokich prędkościach obrotowych (często ponad 5000 obr/min), koniecznych do wytworzenia mocy kilkudziesięciu kW, przy ich stosunkowo małych gabarytach.

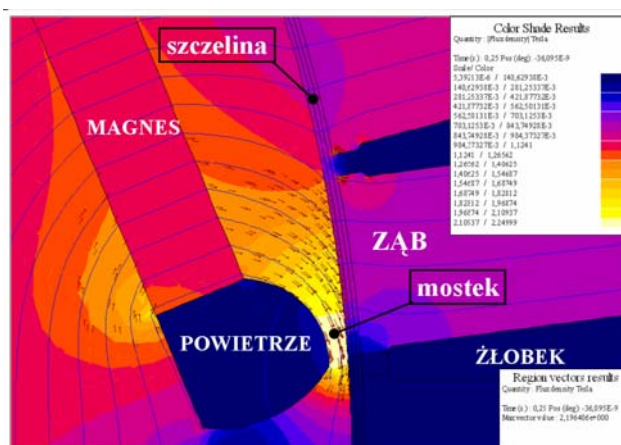
Na rysunku 1 pokazano dwa warianty (generacje) struktur maszyn elektrycznych spotykanych we współczesnych systemach hybrydowych [3-4].

Wariant I posiada płaskie magnesy trwale umieszczone blisko szczeliny powietrznej wewnątrz pakietowanego wirnika w odpowiednio poszerzonych otworach. Dzięki temu uzyskuje się osiowy kanał powietrzny, przy krótszych bokach magnesów, ograniczający ich strumień rozproszenia. Zwartą konstrukcją całego wirnika uzyskuje się przez dwa wąskie mostki, pomiędzy szczeliną technologiczną a kanałem powietrznym, których szerokość dobiera się uwzględniając odkształcenia plastyczne (wynik działania sił odśrodkowych) oraz akceptowane poziomy strumienia rozproszenia.

W kolejnych generacjach maszyn magnetoelektrycznych do hybrydowych napędów samochodowych analizowane są inne sposoby lokowania magnesów tj. w układy V (rys.1 Wariant II), które powodują koncentrację pól magnetycznych w obszarach szczelinowych, polepszając parametry magnetyczne maszyn.

Wyniki badań symulacyjnych

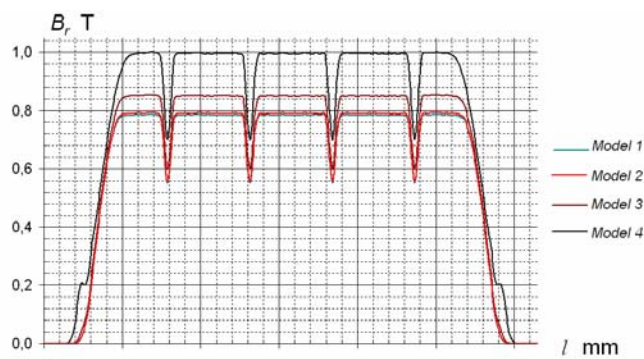
Na rysunku 4 przedstawiono rozkład pola magnetycznego: linie i kierunki przepływu strumienia magnetycznego oraz wartości indukcji magnetycznej w wybranym fragmencie modelu 1, w stanie bezprądowym twornika, na którym widać strumień rozproszenia magnesów przepływający przez mostek i jego nasycenie.



Rys.4. Rozkład pola magnetycznego - Model 1

Tabela 1. Wartość indukcji magnetycznej B_r pośrodku szczeliny technologicznej oraz momentu zaczepowego M_z Model 1-4

Model	B_r mean [T]	B_r rms [T]	B_r max [T]	M_z mean [Nm]	M_z rms [Nm]	M_z max [Nm]
1	0,60	0,67	0,78	0,57	0,68	1,07
2	0,60	0,67	0,79	0,57	0,68	1,08
3	0,65	0,72	0,85	0,67	0,77	1,02
4	0,76	0,84	1,00	0,77	0,89	1,24

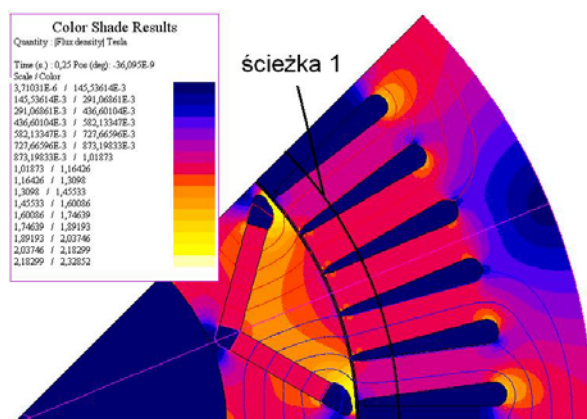


Rys.5. Rozkład składowej użytecznej indukcji magnetycznej B_r pośrodku szczeliny roboczej pod jednym biegunem - Model 1-4

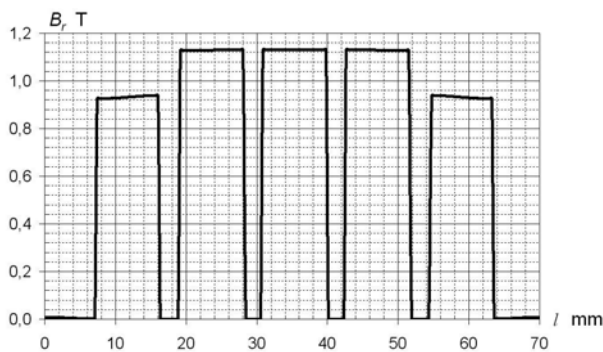
Na rysunku 5 porównano rozkładu składowej użytecznej indukcji magnetycznej B_r ,

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

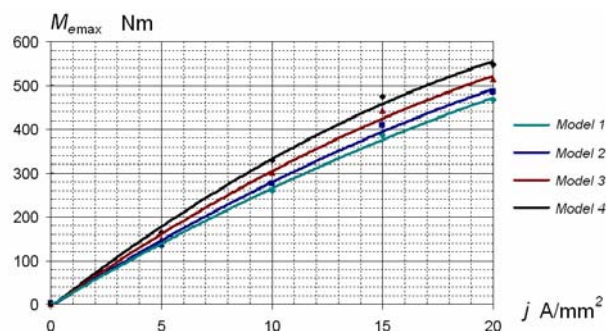
pośrodku szczeliny roboczej pod jednym biegunem Modeli 1-4, w stanie bezprądowym twornika, której wyniki zawarto w tabeli 1.



Rys.6. Rozkład pola magnetycznego - model 4



Rys.7. Rozkład indukcji magnetycznej B_r wzdłuż ścieżki 1, na promieniu 90mm – Model 4



Rys.8. Zależność maksymalnej wartości momentu elektromagnetycznego M_{emax} w funkcji gęstości prądu twornika j - Model 1-4

Ponadto wyznaczono i porównano przebieg momentu zaczepowego M_z w zależności od

położenia kąтового wirnika względem stojana przy jego obrocie o kąt $\beta = 0-7,5^\circ$ z krokiem $0,25^\circ$ Modeli 1-4, w stanie bezprądowym twornika, którego charakterystyczne wartości zawarto w tabeli 1.

Na rysunku 6 przedstawiono rozkład pola magnetycznego oraz wartości indukcji magnetycznej w wybranym fragmencie modelu 4, w stanie bezprądowym twornika.

Na rysunku 7 wyznaczono rozkładu indukcji magnetycznej B_r na promieniu 90 mm dla jednej podziałki biegunowej wzdłuż ścieżki 1 (rys. 6) dla Modelu 4, w stanie bezprądowym twornika.

Na rysunku 8 wyznaczono zależność maksymalnego momentu elektromagnetycznego M_{emax} Modeli 1-4 w funkcji gęstości prądu twornika j (wartość szczytowa).

Wnioski

Moment obrotowy, na poziomie 400 Nm, w hybrydowych systemach napędowych, możliwy jest do osiągnięcia przez współczesne bezszczotkowe uźłobkowane maszyny elektryczne z magnesami trwałymi typu walcowego (cylindrycznego). Możliwe jest to przede wszystkim poprzez odpowiednie ukształtowanie magnetowodu zawierającego wysokoenergetyczne magnesy trwałe w wirniku wytwarzające mole magnetyczne w szczelinach roboczych nawet do poziomu 1 T i forsowanie wysokich gęstości prądu w stojanie sięgających 20 A/mm^2 .

Na podstawie przeprowadzonych badań wpływu rozmieszczenia magnesów w wirniku stwierdza się, że pożądaný poziom momentu możliwy jest w Modelu 1 (pierwszej generacji) przy gęstości prądu stojana $j=16,2 \text{ A/mm}^2$. Natomiast kolejne generacje, polegające na podziale magnesu każdego bieguna na dwa elementy tworzone w układy V i obracane o większy zadany kąt α , powodują zwiększenie powierzchni magnetycznie czynnej każdego bieguna (nie wydłużając drogi dla głównego strumienia magnetycznego), wywołują efekt koncentracji pola magnetycznego w szczelinie roboczej z poziomu 0,6 T- Model 1 do 0,76 T- Model 4. To pozwala na obniżenie gęstości prądu stojana do $j=13,5 \text{ A/mm}^2$, które decydują o stratach elektrycznych i magnetycznych silnika.

W tym miejscu należy również zauważyć, że silna koncentracja pola magnetycznego może pociągnąć za sobą nasycenie się elementów ferromagnetycznych stojana i wirnika co może spowodować niepożądane obniżenie parametrów użytkowych maszyny.

Dzięki zaproponowanej strukturze stojana charakteryzującej się między innymi: małym otwarciem żłobka i relatywnie szerokimi zębami (9mm) unika się nasycenia stojana (rys. 7), nawet przy silnej koncentracji pola magnetycznego, która występuje w Modelu 4 (rys.6). Taka konstrukcja gwarantuje również bardzo niski poziom momentu zaczepowego, występującego w strukturach zębowych maszyn z magnesami, który nie wpłynie w istotny sposób na pulsację momentu obrotowego.

LITERATURA

- [1] Afonin A., Innovative magnetic systems of electrical machines, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2007) nr 11, 145-148
- [2] Pawelski Z., Pawelski W., Pałczyński T., Wybrane prototypowe i studialne pojazdy hybrydowo-elektryczne, *Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne* Nr 76/2007
- [3] J. S. Hsu, C. W. Ayers, C. L. Coomer: Report on TOYOTA/PRIUS motor design and manufacturing assessment, Engineering Science & Technology Division,
- [4] R. H. Staunton, S. C. Nelson, P. J. Otaduy, J. W. McKeever, J. M. Bailey, S. Das, R. L. Smith: PM Motor Parametric Design Analyses for a Hybrid Electric Vehicle Traction Drive Application,
- [5] www.greencar.com

Autor: dr inż. Piotr Paplicki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: paplicki@zut.edu.pl